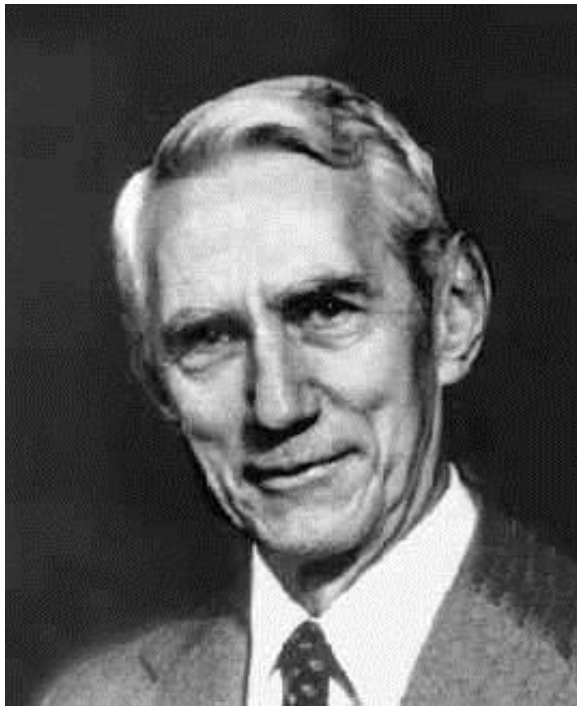


# Teoría de las Comunicaciones

**Claudio Enrique Righetti**  
*Segundo Cuatrimestre del 2014*

**Departamento de Computación**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Universidad de Buenos Aires**  
**Argentina**



# Teoría de la Información y Codificación

Codificación

Claude Shannon

Consideremos un código instantáneo con un alfabeto fuente

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$$

y un alfabeto código  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ . Sean  $X_1, X_2, \dots, X_q$  las palabras del código y, por definición,  $l_i$  la longitud (es decir, el número de símbolos del código) de la palabra  $X_i$ . Normalmente es interesante que las longitudes de las palabras del código sean lo más cortas posible. La condición necesaria y suficiente para que exista un código instantáneo con palabras de longitud  $l_1, l_2, \dots, l_q$ , viene definida por la *inecuación de Kraft* (Kraft, 1949).

La condición necesaria y suficiente para la existencia de un código instantáneo de longitudes  $l_1, l_2, \dots, l_q$  es que

$$\sum_{i=1}^q r^{-l_i} \leq 1$$

donde  $r$  es el número de símbolos diferentes que constituyen el alfabeto código.

En el caso de alfabeto binario, la inecuación de Kraft se transforma en

$$\sum_{i=1}^q 2^{-l_i} \leq 1 \quad (3-3)$$

donde la suma se extiende a todas las palabras del código bloque. Antes de probar esta inecuación, es interesante ver en qué forma puede

# Codificación

---

- ▶ Establecer una correspondencia entre los símbolos de una fuente y los símbolos del alfabeto de un código.
- ▶ Proceso mediante el cual también podemos lograr una representación más eficiente de la información (eliminar redundancia).

# Codificación : condiciones

---

- ▶ Bloque
- ▶ Singular
- ▶ Separable (unívocamente decodificable)

# Condición de los prefijos

---

- ▶ La condición *necesaria y suficiente* para que un código sea *instantáneo* es que sus palabras cumplan la condición de los prefijos:
- ▶ No exista palabra que sea prefijo de otra palabra de longitud mayor.

# Códigos eficientes

---

- ▶ Asignar palabras más cortas a símbolos más probables
  - ▶  $l_i$  : longitud de la palabra codificada del mensaje  $m_i$
  - ▶  $r$  : # de símbolos del alfabeto del código
    - ▶  $L = \sum p_i l_i$  : Longitud media de un código
    - ▶  $L \log r \geq H(s)$
- ▶  $\log r$  : Cantidad promedio máxima de información de un símbolo del código.
- ▶  $h = H(S) / (L \log r)$  Eficiencia

Si exigimos que el código sea instantáneo, la inecuación de Kraft impone que el argumento del segundo logaritmo del segundo miembro de (4-6) sea igual o menor que la unidad. Por lo tanto, su logaritmo deberá ser igual o menor que cero, y

$$H(S) \leq L \log r \quad (4-7a)$$

o bien

$$\frac{H(S)}{\log r} \leq L \quad (4-7b)$$

$H(S)$  viene medida en bits en la ecuación (4-7b). Recordemos que  $L$  es el número medio de símbolos utilizados para codificar  $S$ . Expresando la entropía asimismo en unidades  $r$ -arias, como en (2-5c), la relación (4-7b) podría escribirse en la forma

$$H_r(S) \leq L \quad (4-7c)$$

**Ejemplo 2-1.** Consideremos la fuente  $S = \{s_1, s_2, s_3\}$  con  $P(s_1) = 1/2$  y  $P(s_2) = P(s_3) = 1/4$ . Entonces

$$\begin{aligned} H(S) &= 1/2 \log 2 + 1/4 \log 4 + 1/4 \log 4 \\ &= 3/2 \text{ bits} \end{aligned}$$

Si medimos  $I(s_i)$  en unidades de orden  $r$ ,  $H(S)$  vendrá dada en la misma unidad, y tendremos

$$H_r(S) = \sum_i P(s_i) \log_r \frac{1}{P(s_i)} \text{ unidades de orden } r \quad (2-5b)$$

De la ecuación (2-2) se deduce

$$H_r(S) = \frac{H(S)}{\log r} \quad (2-5c)$$

$$\log_a x = \frac{1}{\log_b a} \log_b x \quad (2-2)$$



# Codificador óptimo

---

Nos falta encontrar el segundo término pendiente en la definición de cantidad de información: *codificador óptimo*.

Introduciendo el signo negativo dentro del logaritmo en la expresión de la entropía, ésta nos quedará como:

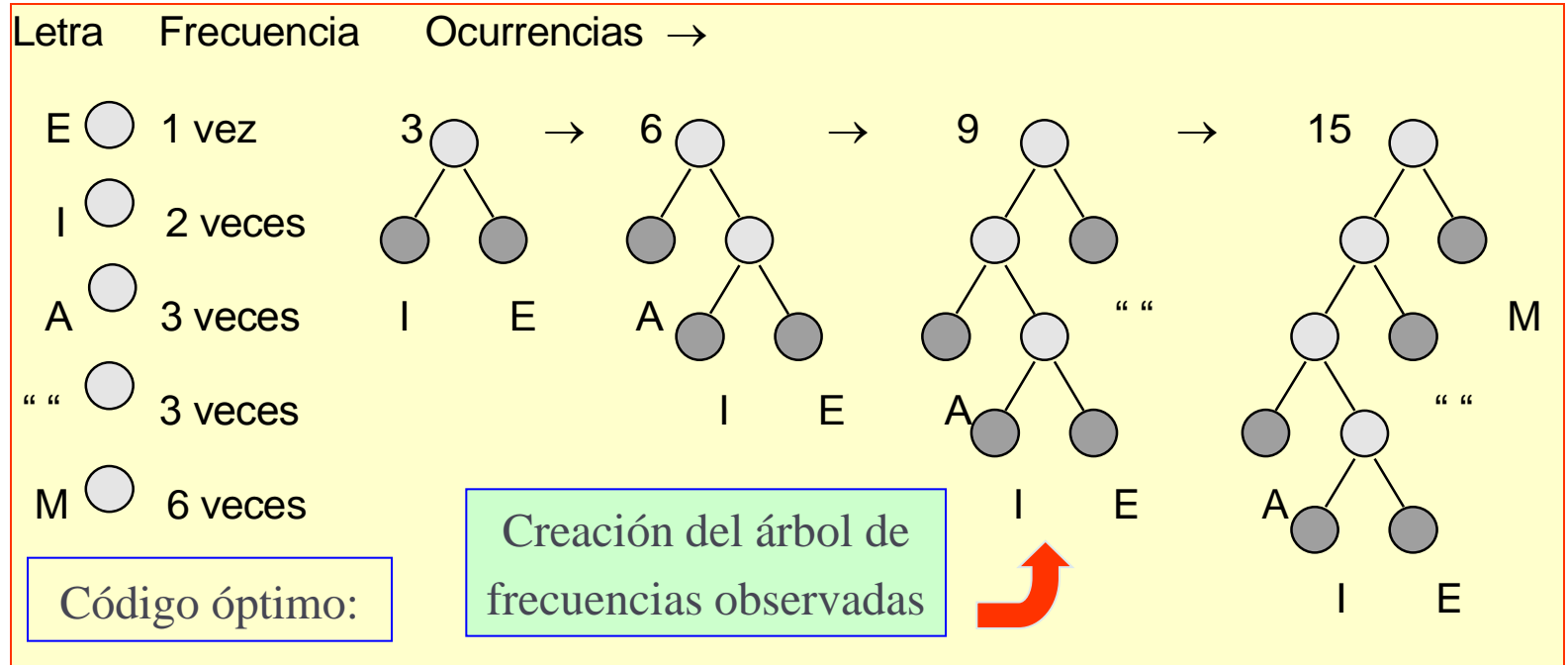
$$H(X) = \sum_i p(x) \log_2 [1/p(x)]$$

La expresión  $\log_2 [1/p(x)]$  representa el número necesario de bits para codificar el mensaje  $X$  en un codificador óptimo.

Codificador óptimo es aquel que para codificar un mensaje  $X$  usa el menor número posible de bits.

# Codificación de Huffman

Mensaje: MI MAMA ME MIMA



M = 1   " " = 01   A = 000   I = 0010   E = 0011

Mensaje: 1 0010 01 1 000 1 000 01 1 0011 01 1 0010 1 000 (33 bits)

Pregunta: ¿Con cuántos bits se codificaría si se usara ASCII? Saque conclusiones.



# Nivel Físico

## Fundamentos

<http://www.sciencephoto.com/media/225137/view>

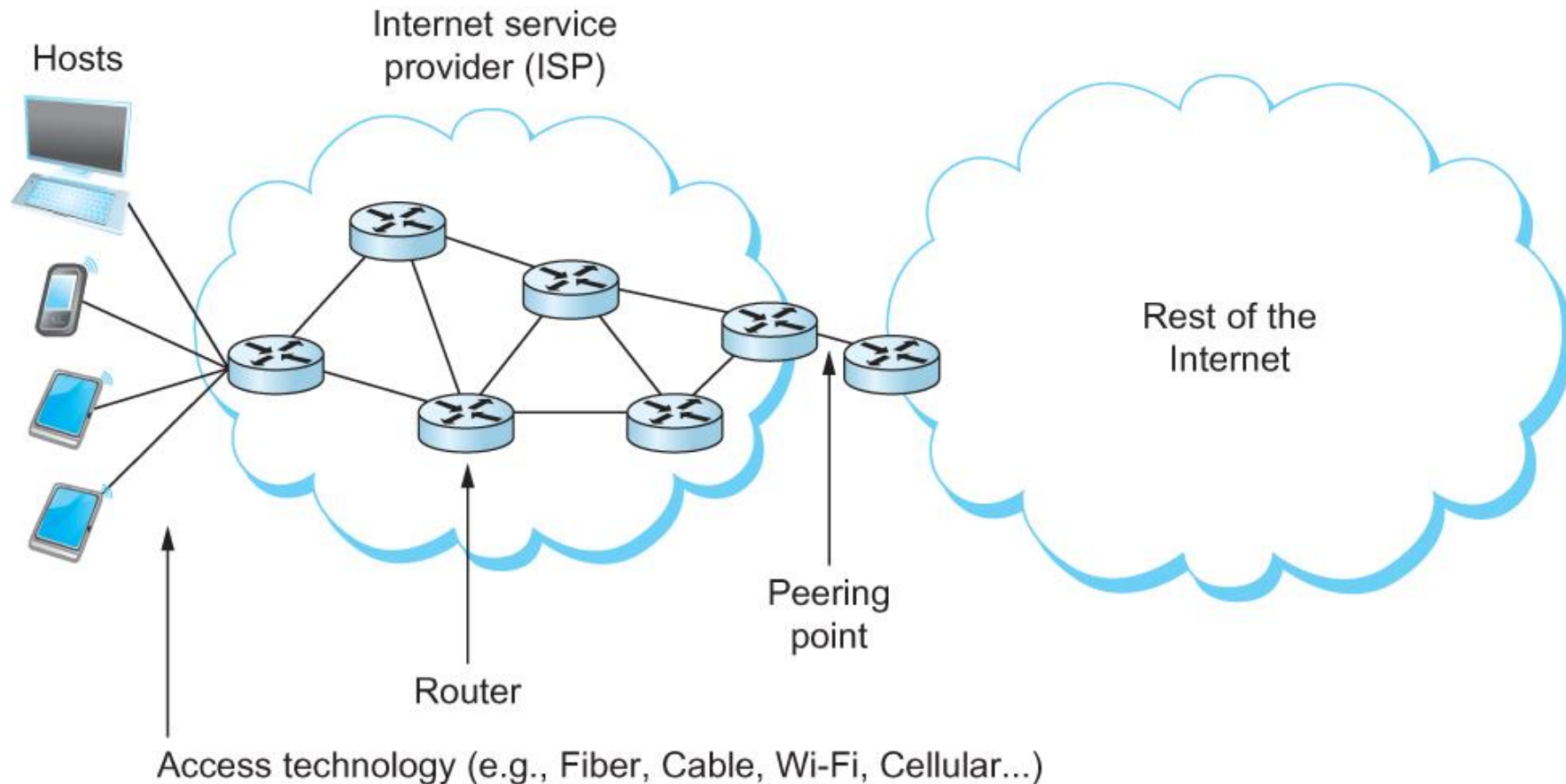
# Agenda

---

- ▶ Medios de Transmisión : guiados y no guiados
- ▶ En el dominio de la frecuencia -Fourier
- ▶ La red telefónica
- ▶ Conversión analógica – digital
- ▶ Modulación (Modulación Digital / Portadora Analógica)
- ▶ Codificación ( “Modulación Digital/ Portadora Digital” )

# Para “conectarnos”: Medios de transmisión

---



# Los medios de transmisión

Guiados y no guiados

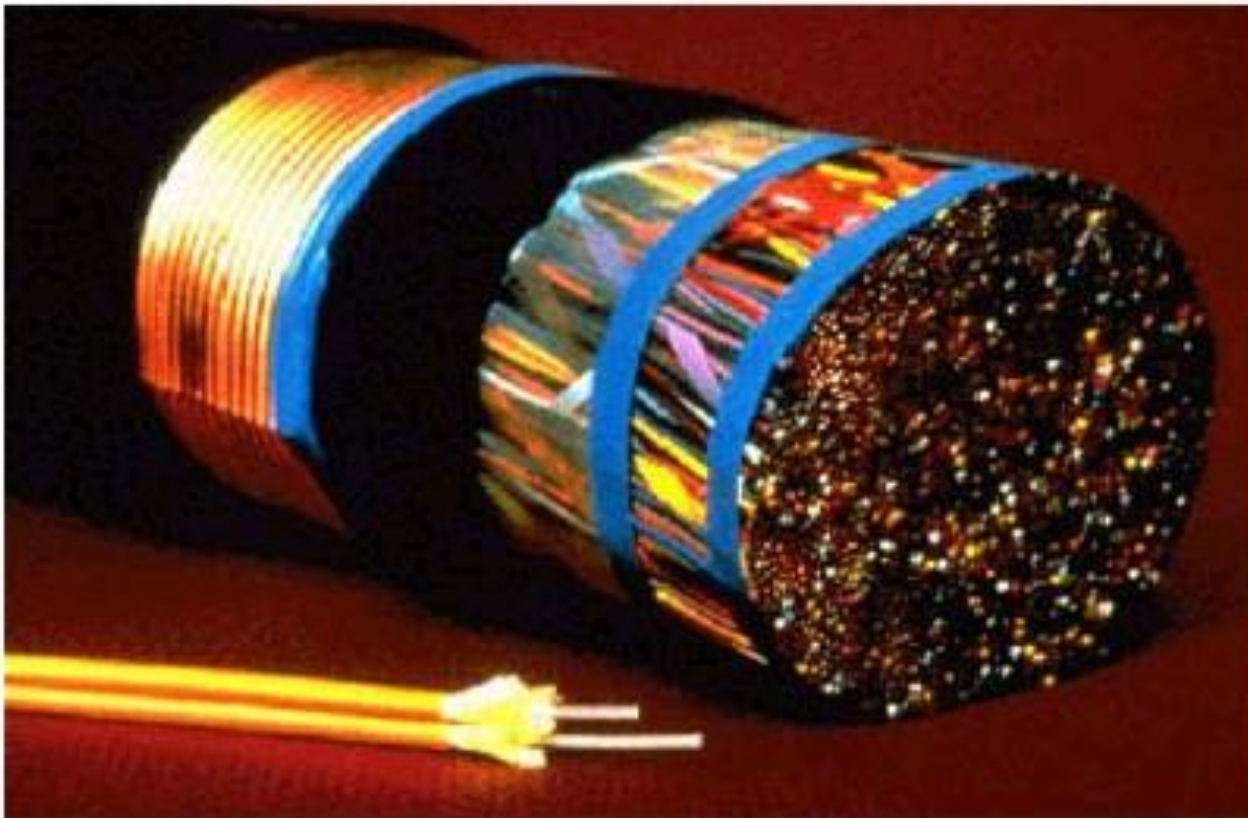
# Medios de transmisión por guía de onda

---

- Par trenzado.
- Coaxial .
- Red Eléctrica (Power Line)
- Fibra óptica.
- Fibra óptica plástica multimodo

# Par de cobre

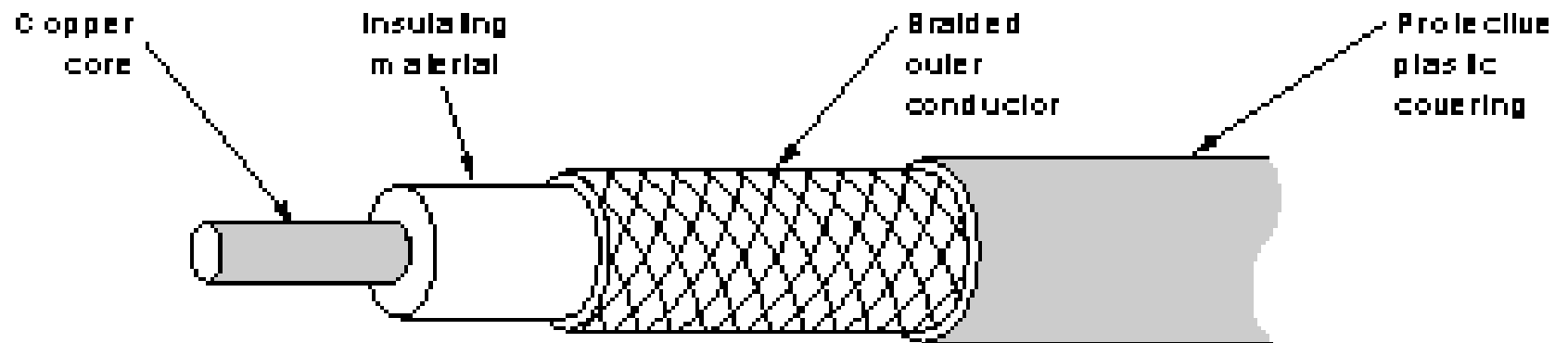
---





# Cable coaxial

---



**Fig. 2-3.** A coaxial cable.

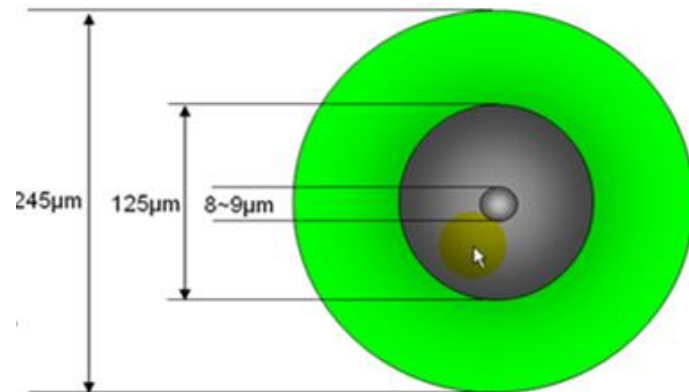
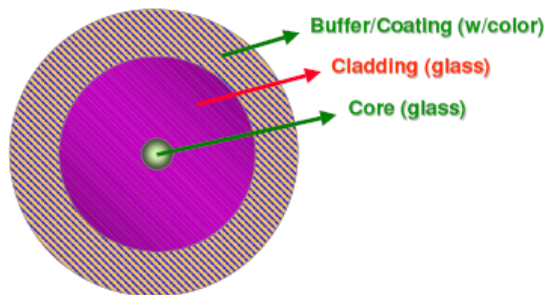
# Coaxil : Redes CATV tradicionales

---

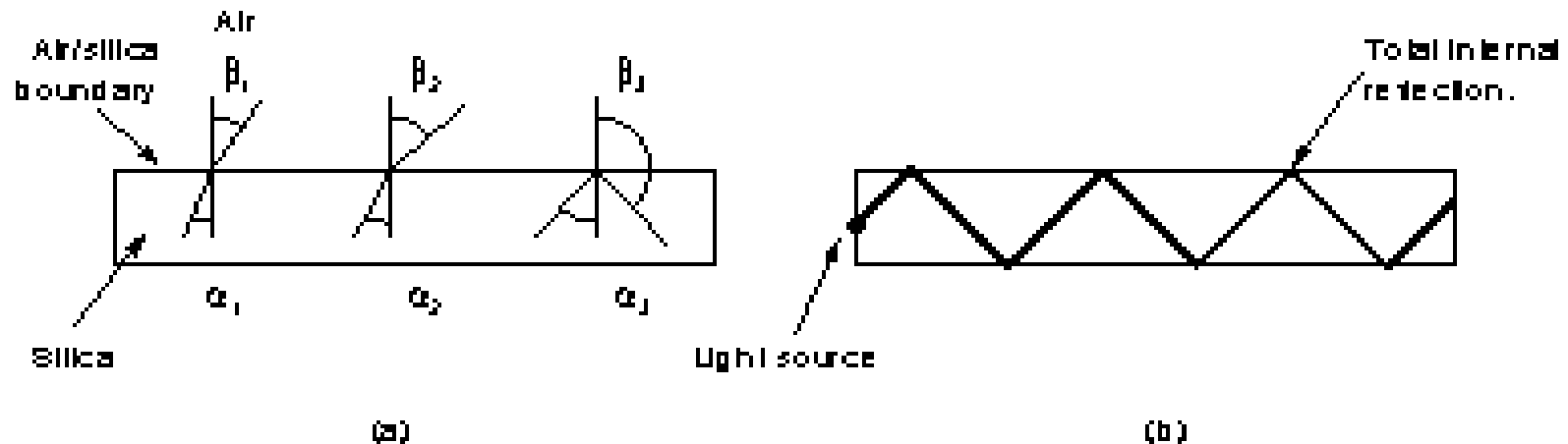
- ▶ Las redes CATV (Community Antenna TeleVision) nacieron (1949) para resolver problemas de recepción en zonas de mala cobertura.
- ▶ La antena (centro emisor) se ubicaba en sitio elevado con buena recepción. La señal se enviaba a los usuarios hacia abajo (downstream).
- ▶ Cable coaxial de 75  $\Omega$
- ▶ Amplificadores cada 0,5-1,0 Km. Hasta 50 en cascada.
- ▶ Red unidireccional. Amplificadores impedían transmisión ascendente.

# Fibra Óptica

La función principal de las fibras ópticas (FO) es la de guiar las ondas de luz con un mínimo de atenuación y distorsión. Las FO están compuestas de vidrio solidificado con un alto grado de pureza en capas llamadas núcleo (*core*), revestimiento (*cladding*) y Buffer o cubierta. La luz se propaga únicamente por el núcleo con una velocidad de propagación de aproximadamente hasta dos tercios de la velocidad de la luz en el vacío.



# Fibra óptica: Reflexión

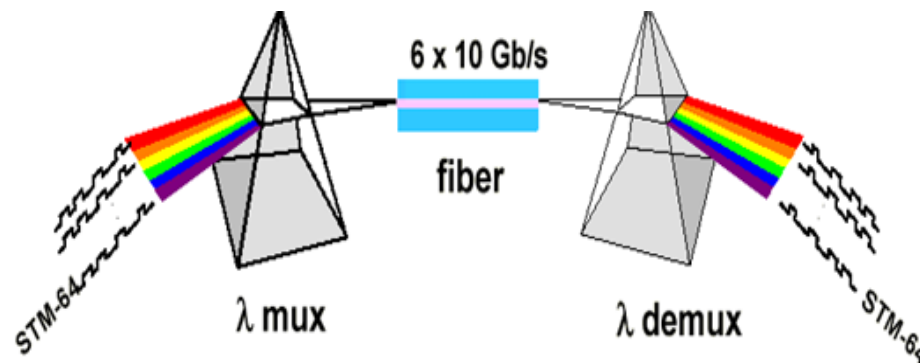


**Fig. 2-5.** (a) Three examples of a light ray from inside a silica fiber impinging on the air/silica boundary at different angles. (b) Light trapped by total internal reflection.

# Multiplexación por Longitud de Onda (WDM)

---

La capacidad de una fibra óptica (FO) se puede incrementar transmitiendo diversas longitudes de onda en una única fibra. Esta técnica bien conocida de *Multiplexación por división de frecuencia*, FDM (*Frequency Division Multiplexing*), se denomina en los sistemas ópticos Multiplexación por División de Longitud de Onda o simplemente Multiplexación por Longitud de Onda ( *Wavelength Division Multiplexing*).



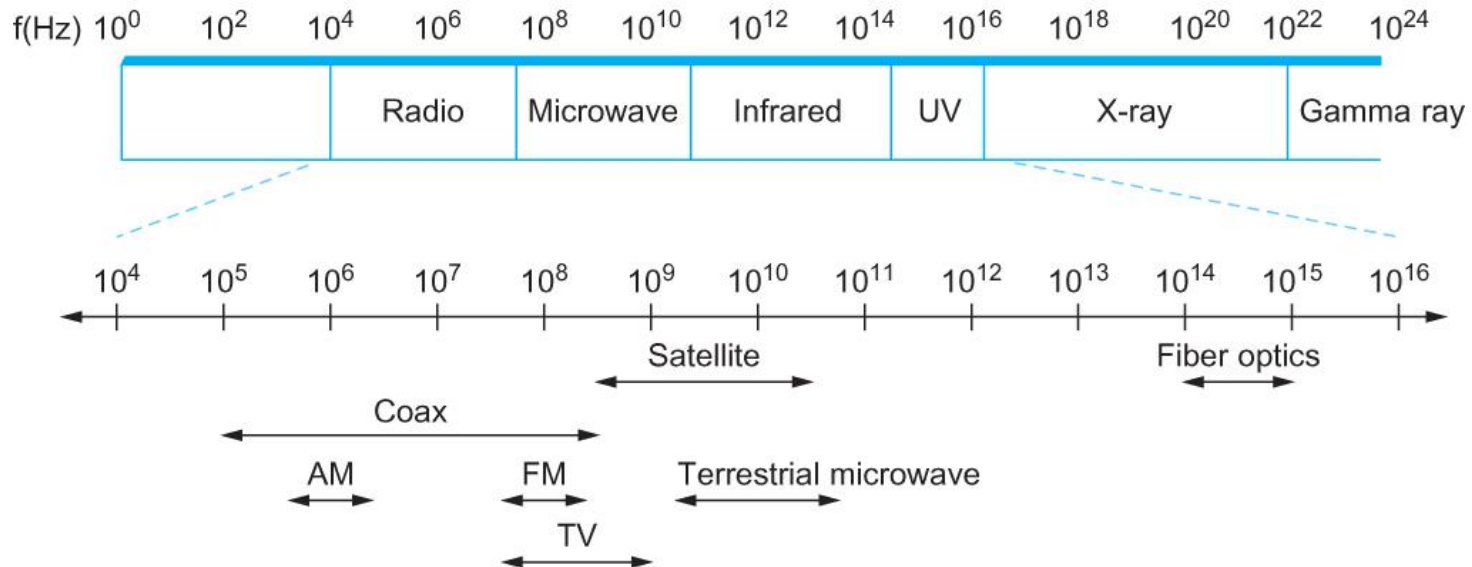
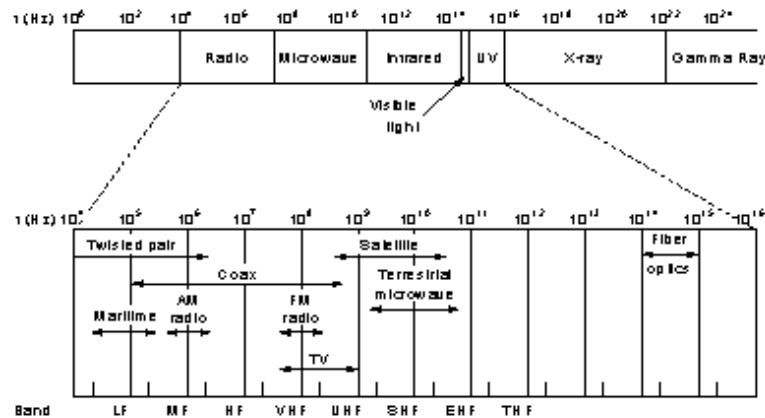
# Medios de transmisión sin guía de onda (wireless)

---

## El espectro electromagnético

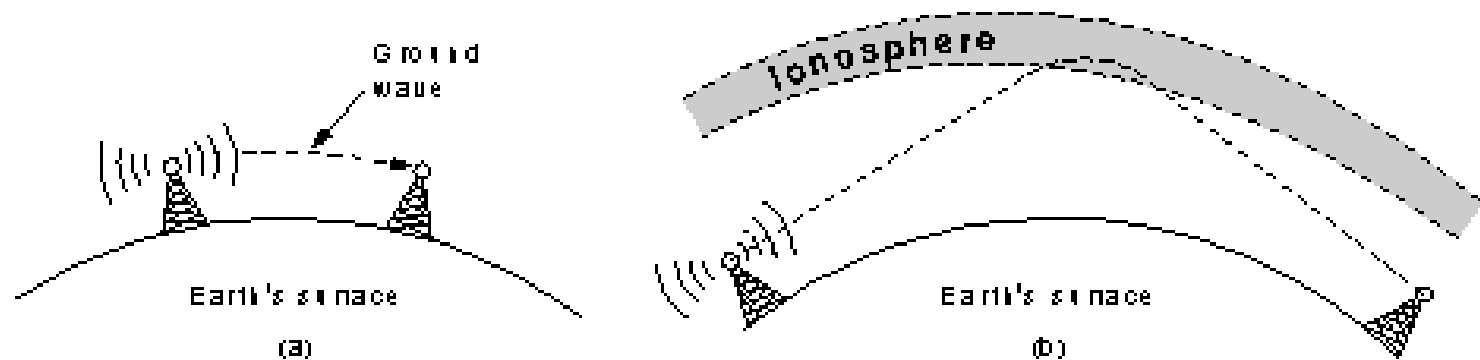
- ▶ Transmisión por radio.
- ▶ Transmisión por microondas.
- ▶ Transmisión por ondas infrarrojas.
- ▶ Transmisión por láser.

# El espectro electromagnético



# Radio

---



**Fig. 2-12.** (a) In the VLF, VF, and MF bands, radio waves follow the curvature of the earth. (b) In the HF they bounce off the ionosphere.



# Láser

---

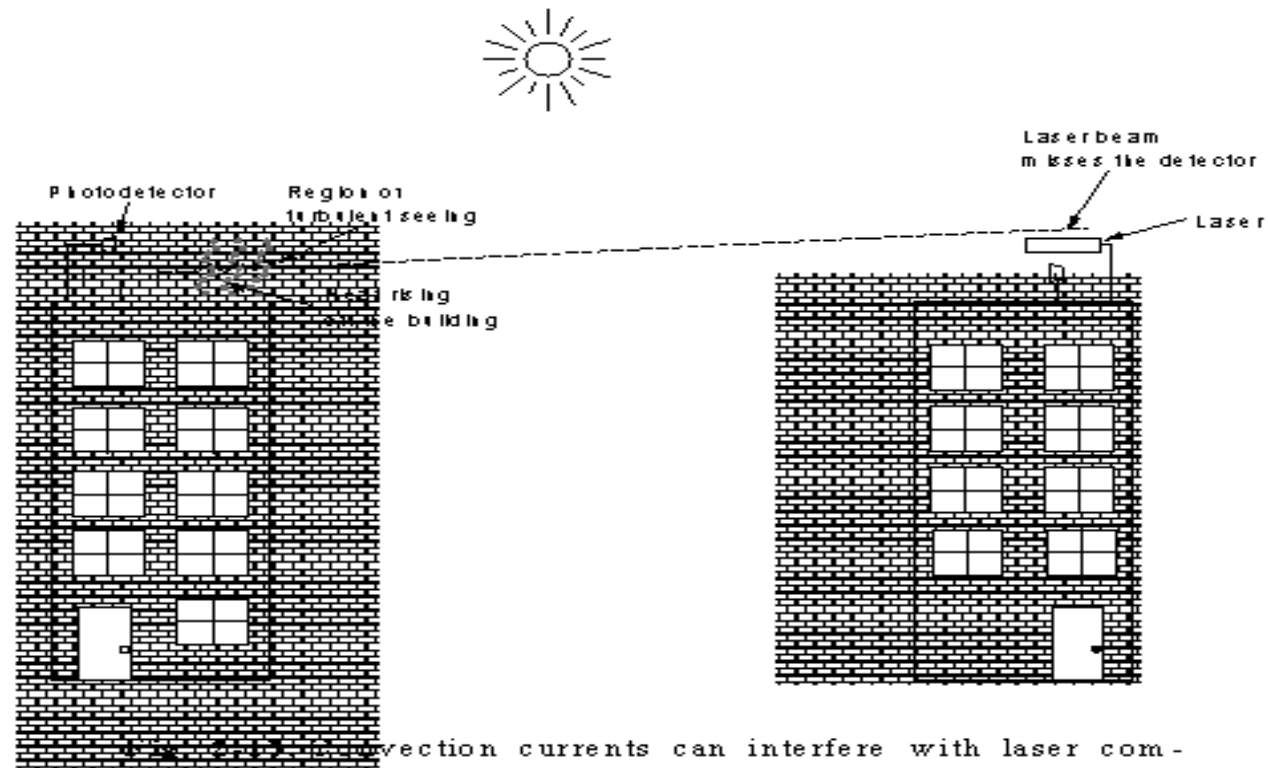


Figure 2.12 Convection currents can interfere with laser communication systems. A bidirectional system, with two lasers, is pictured here.

# Red Telefónica

Fundamentos de las red de telefonía fija por  
conmutación de circuitos

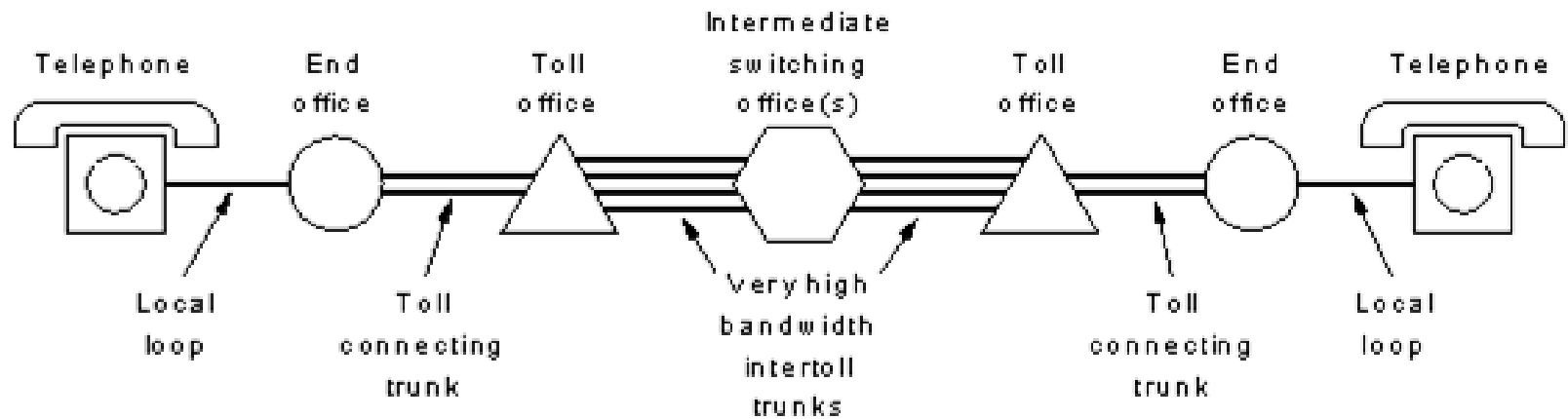
# Estructura del sistema telefónico

---

- ▶ PSTN (Public Switched Telephone Network)
- ▶ Objetivo: Transmitir la *voz humana* en una forma más o menos reconocible.
- ▶ El sistema telefónico tradicional se encuentra organizado en una jerarquía multinivel altamente redundante
- ▶ Componentes:
  - ▶ Local loops (pares trenzados, señalización analógica)
  - ▶ Troncales (fibra óptica o microondas, digital)
  - ▶ Oficinas de conmutación

# Red telefónica

---



# Troncales y multiplexión

---

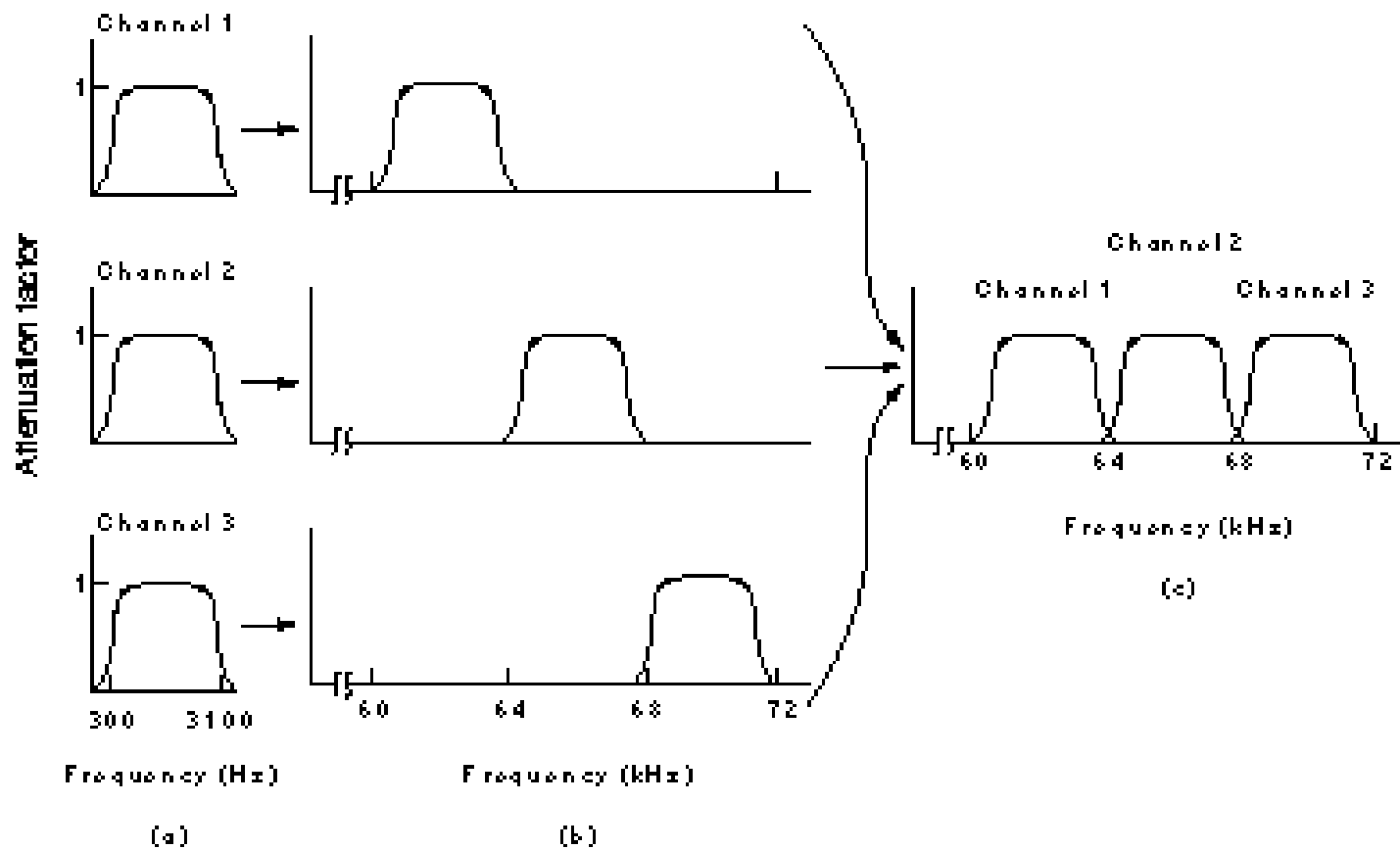
- ▶ Debido a consideraciones económicas, las compañías telefónicas han desarrollado políticas elaboradas para multiplexar varias conversaciones sobre un único troncal físico.
- ▶ FDM (Frequency Division Multiplexing)
  - ▶ El espectro de frecuencias es dividido entre canales lógicos: cada usuario tiene posesión exclusiva de alguna banda de frecuencia
- ▶ TDM (Time Division Multiplexing)
  - ▶ Los usuarios toman turnos (en round robin), obteniendo periódicamente cada uno el ancho de banda completo por un pequeño período de tiempo

# FDM vs. TDM

---

- ▶ Ejemplo: difusión de radio AM
- ▶ Espectro reservado  $\sim 1$  Mhz (500-1500 kHz)
- ▶ Diferentes frecuencias reservadas a diferentes canales lógicos (emisoras). Cada una opera en una porción del espectro  $\Rightarrow$  FDM
- ▶ Cada estación tiene dos subcanales lógicos: música y avisos comerciales. Los dos alternan en la misma frecuencia, primero una ráfaga de música y luego una ráfaga de avisos y así siguiendo  $\Rightarrow$  TDM

# FDM



# TDM

---

- ▶ Aunque FDM se utiliza todavía sobre cables de cobre o canales de microondas, requiere circuitería analógica.
- ▶ En contraste TDM puede ser manejado enteramente por electrónica digital, y se ha vuelto de más amplio uso en años recientes.
- ▶ TDM solo puede ser utilizado para datos digitales
- ▶ Como el local loop produce señales analógicas, es necesario realizar una conversión analógico/digital en la end office, donde todos los local loops individuales se combinan sobre los troncales
- ▶ Cómo múltiples señales de voz analógicas se digitalizan y combinan sobre un único troncal digital ?

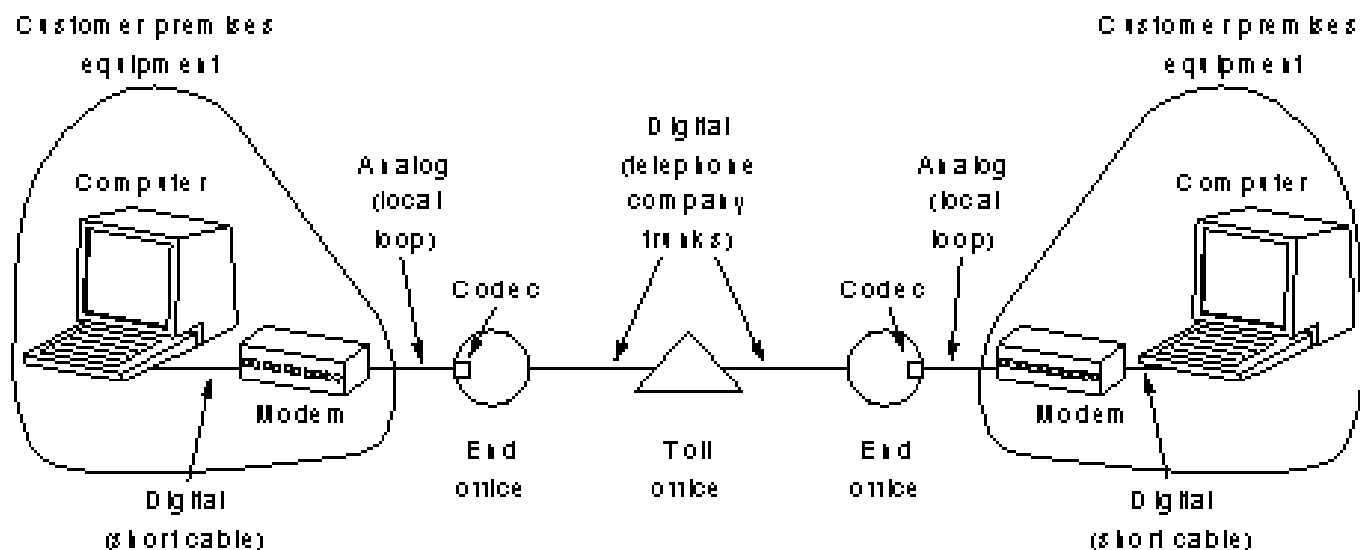


# Conversión Analógica - Digital

Teorema del Muestreo – Codificación  
Modulación PCM

# Conversión analógico/digital

---



**Fig. 2-17.** The use of both analog and digital transmission for a computer to computer call. Conversion is done by the modems and codecs.

# Teorema del Muestreo

A.K.A Nyquist-Shannon, de Whittaker-Nyquist-Kotelnikov Shannon, criterio de Nyquist o teorema de Nyquist

# Muestreo

---

- ▶ Vimos que las señales periódicas se pueden descomponer como un sumatorio de senos y cosenos cada uno de una amplitud, frecuencia y fase diferente (Desarrollo en Serie de Fourier ) Si dichas sinusoides las muestreamos, el caso más crítico de muestreo será aquella de mayor frecuencia (frecuencia máxima  $f_m$  que corresponde con el periodo mínimo  $T_{\min}=1/f_m$ ) la cual vamos a llamar:
- ▶  $f(t)=A \sin(2\pi f_m t+ \phi)$  donde A: amplitud, t: tiempo y  $\phi$ : fase de la señal.
- ▶ El **Teorema de Muestreo formulado por Nyquist 1924 dice:** que si queremos reconstruir una señal de frecuencia máxima  $f_m$ , debemos de muestrear a  $2f_m$  y la frecuencia de muestreo (*sampling*) se llama  $f_s$  o también frecuencia de modulación.

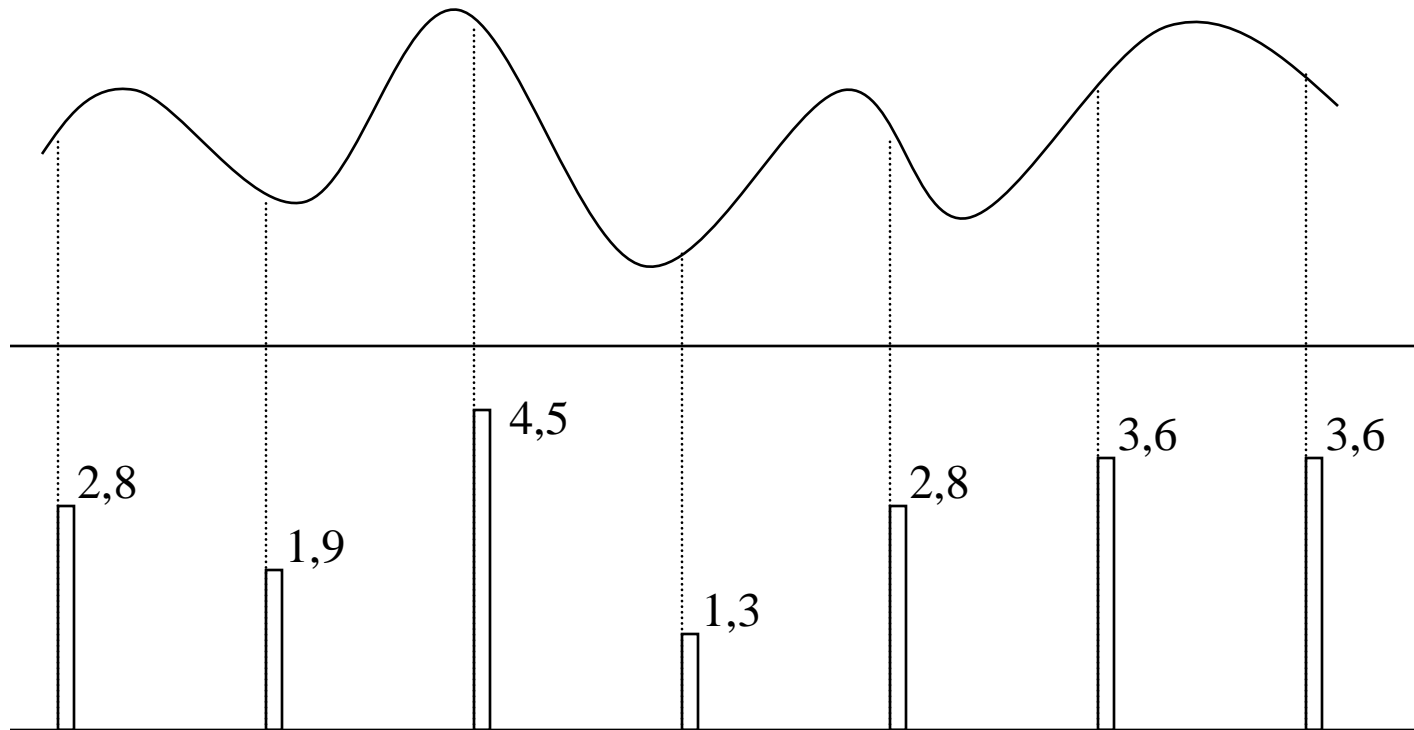
# Muestreo

---

- ▶ **Ejemplo 1:** los CD de audio muestrean la señal 44.100 veces por segundo, por tanto pueden captar frecuencias de hasta 22,05 KHz
- ▶ **Ejemplo 2:** si la voz ( en telefonía !!) tiene un espectro de 4KHz, para poder muestrear y recuperar la señal requeriríamos 8.000 muestras por segundo.
- ▶ Cuantos dígitos binarios uso para codificar cada muestra ?? 4 , 7 , 8, 16 ..?? Veamos en PCM

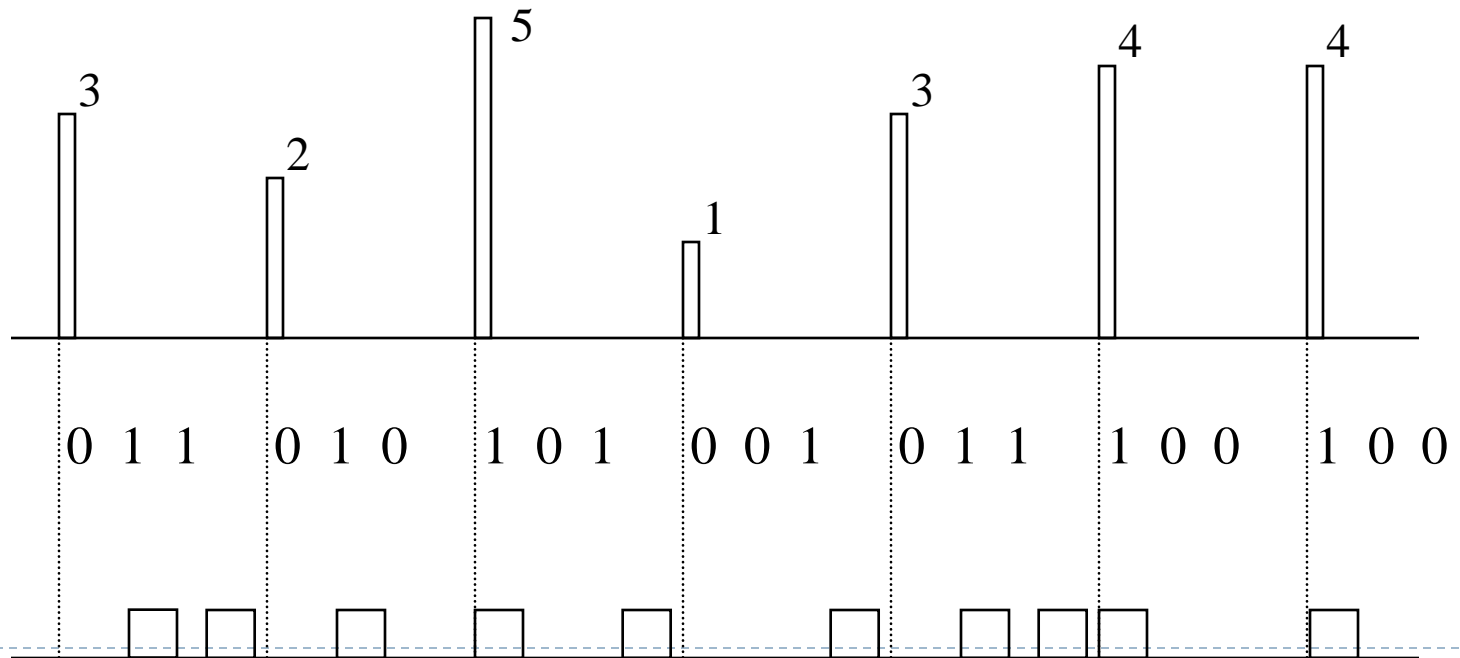
# La conversión Analógica Digital

- ▶ Consta de dos etapas
  - ▶ Se muestrea la señal al doble del ancho de banda de la misma obteniendo un tren de pulsos de amplitud variable (PAM)



# CAD

- Se cuantifican las muestras aproximándolas mediante un entero de  $n$  bits



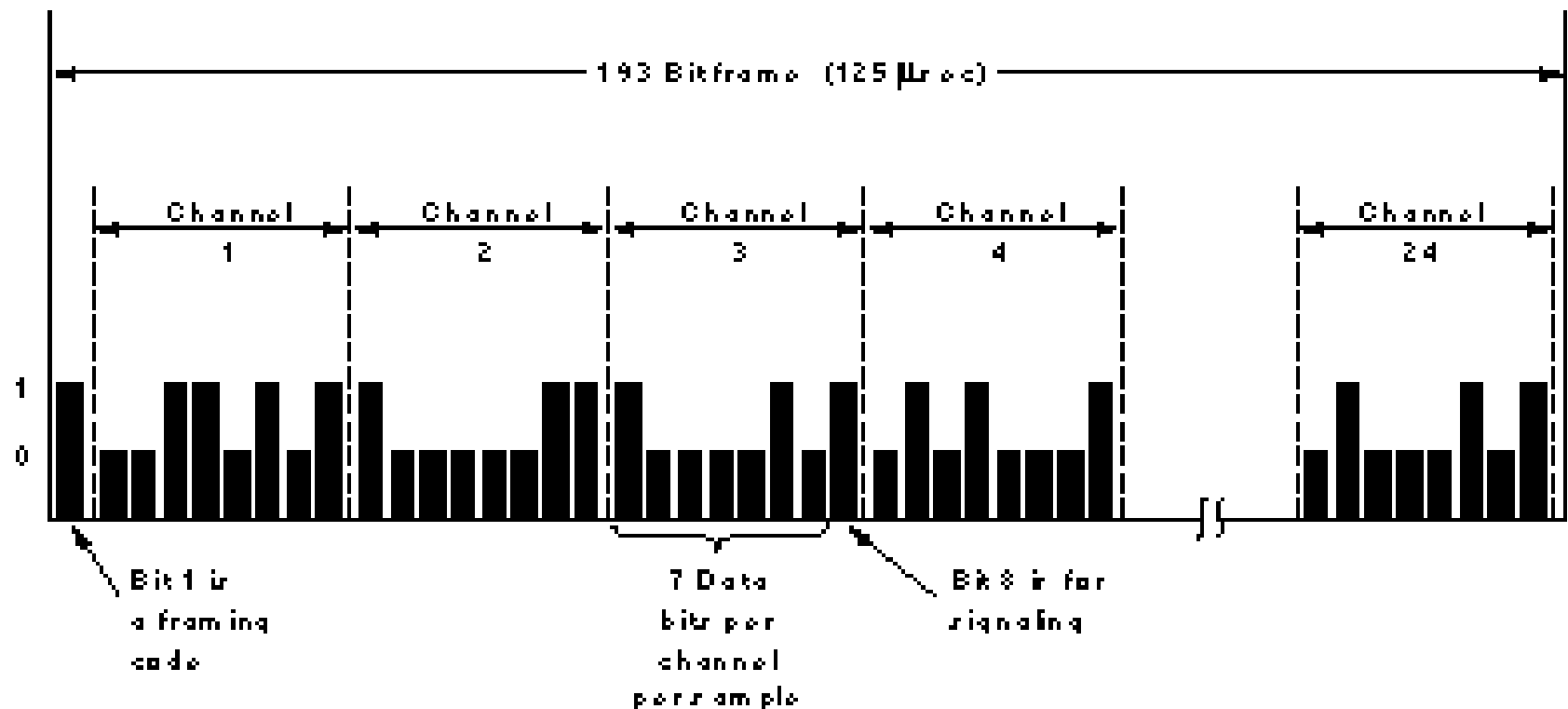
# PCM (Pulse Code Modulation)

---

- ▶ Las señales analógicas son digitalizadas por un dispositivo llamado *codec* (coder-decoder), produciendo un número de 8 bits por muestra ( en realidad uno es para señalización) .
- ▶ El codec toma 8000 muestras por segundo ( $125 \mu\text{seg}/\text{muestra}$ ) debido a que el teorema de Nyquist establece que esto es suficiente para capturar toda la información de un canal telefónico de 4 KHz de ancho de banda
- ▶ “”Ancho de banda”” de cada canal de voz = 64 Kbps.
- ▶ Como consecuencia, virtualmente todos los intervalos de tiempo en el sistema telefónico son múltiplos de  $125 \mu\text{seg}$ .



# Transporte T1 (1.544 Mbps)



# Enlaces : “Transporte “

---

- ▶ *T1*: Utilizado en Norteamérica y Japón. Consiste de 24 canales de voz multiplexados juntos.
- ▶ Un frame *T1* consiste de  $24 \times 8 = 192$  bits, más un bit extra para framing, conduciendo a 193 bits cada 125  $\mu$ seg.
- ▶  $1 / 0.000125 \text{ seg.} \times 193 \text{ bits} = 1544000 \text{ bps}$

$$\mathbf{T1=1,544 \text{ Mbps}}$$

- ▶ ITU tiene también una recomendación para un carrier PCM a 2048 Mbps llamado *E1*

# Retardo ( delay ) total

---

$$T_{\text{total}} = T_{\text{proc}} + T_{\text{cola}} + T_{\text{trans}} + T_{\text{prop}}$$

- ▶  $T_{\text{proc}}$  = retardo de proceso
  - ▶ Normalmente unos pocos microsegundos o menos.
- ▶  $T_{\text{cola}}$  = retardo de cola
  - ▶ Depende de la congestión.
- ▶  $T_{\text{trans}}$  = retardo de transmisión
  - ▶ = Tamaño Trama/Velocidad de transmisión, significativo para enlaces de baja velocidad.
- ▶  $T_{\text{prop}}$  = retardo de propagación
  - ▶ Desde unos pocos microsegundos hasta a cientos de milisegundos.

# Retardo de Procesamiento

- Tiempo requerido en analizar el encabezado y decidir a dónde enviar el paquete (ej. decisión de enrutamiento)
  - En un enrutador, dependerá del número de entradas en la tabla de rutas, la implementación (estructuras de datos), el hardware, etc.
- Puede incluir la verificación de errores

# Retardo de Colas

- Tiempo en que el paquete espera en un *búfer* hasta ser transmitido
- El número de paquetes esperando en cola dependerá de la intensidad y la naturaleza del tráfico
- Los algoritmos de colas en los enrutadores intentan adaptar estos retardos a ciertas preferencias, o imponer un uso equitativo

# Retardo de Transmisión

- El tiempo requerido para *empujar* todos los bits de un paquete a través del medio de transmisión
- Para  $R$ =Tasa de bits,  $L$ =Longitud del paquete,  $d$  = delay o retardo:

$$d = L/R$$

- Por ejemplo, para transmitir 1024 bits utilizando Fast Ethernet (100 Mbps):

$$d = 1024/1 \times 10^8 = 10.24 \text{ micro segundos}$$

# Retardo de Propagación

- Una vez que el bit es 'empujado' en el medio, el tiempo transcurrido en su propagación hasta el final del trayecto físico
- La velocidad de propagación del enlace depende más que nada de la distancia medio físico
  - Cercano a la velocidad de la luz en la mayoría de los casos
- Para  $d$  = distancia,  $s$  = velocidad de propagación

$$D_p = d/s$$

# Transmisión vs. Propagación

- Puede ser confuso al principio
- Considerar un ejemplo:
  - Dos enlaces de 100 Mbps.
    - Fibra óptica de 1 Km
    - Via Satélite, con una distancia de 30Km entre base y satélite
  - Para dos paquetes del mismo tamaño, cuál tiene mayor retardo de transmisión? Y propagación?

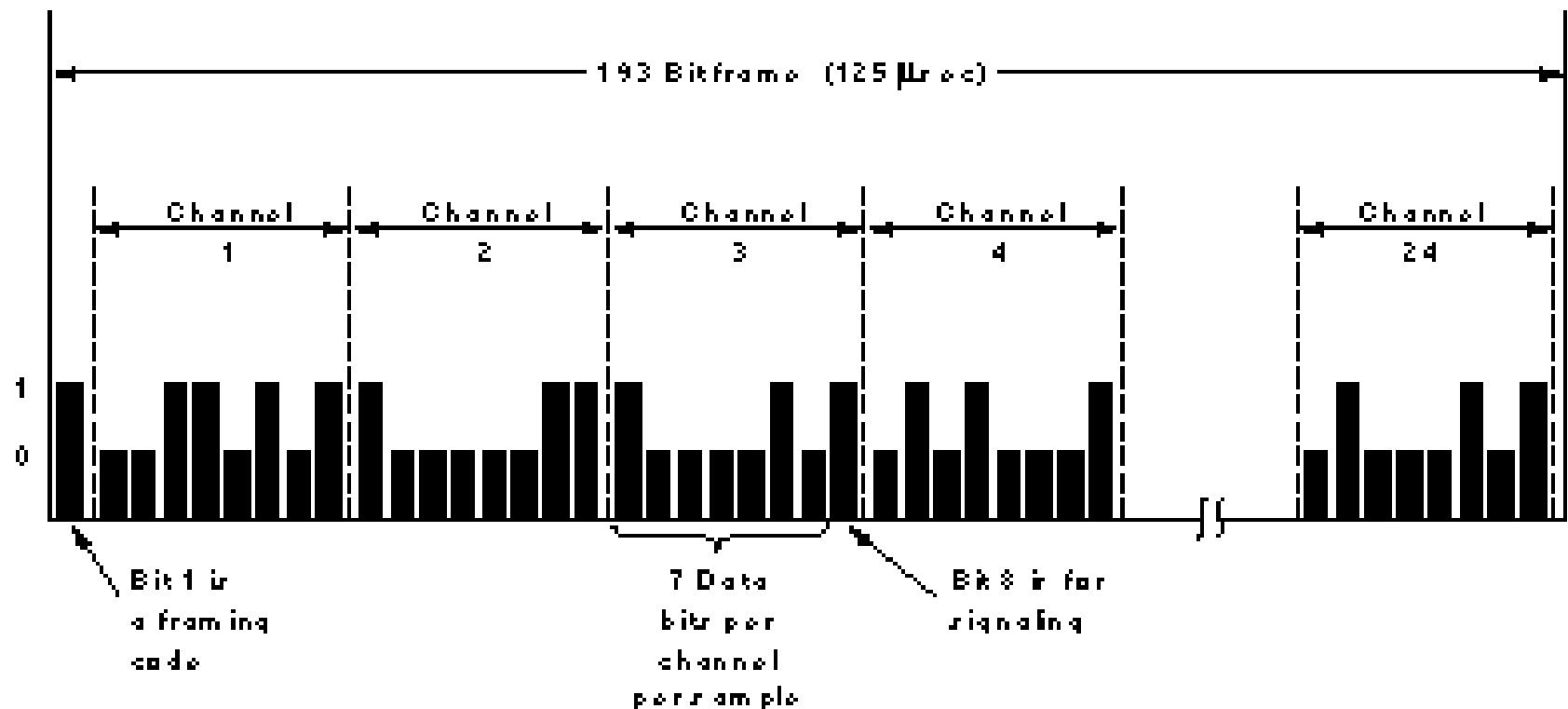


# PCM (Pulse Code Modulation)

---

- ▶ Las señales analógicas son digitalizadas por un dispositivo llamado *codec* (coder-decoder), produciendo un número de 8 bits por muestra ( en realidad uno es para señalización) .
- ▶ El codec toma 8000 muestras por segundo ( $125 \mu\text{seg}/\text{muestra}$ ) debido a que el teorema de Nyquist establece que esto es suficiente para capturar toda la información de un canal telefónico de 4 KHz de ancho de banda
- ▶ “”Ancho de banda”” de cada canal de voz = 64 Kbps.
- ▶ Como consecuencia, virtualmente todos los intervalos de tiempo en el sistema telefónico son múltiplos de  $125 \mu\text{seg}$ .

# Transporte T1 (1.544 Mbps)



# Enlaces : “Transporte “

---

- ▶ *T1*: Utilizado en Norteamérica y Japón. Consiste de 24 canales de voz multiplexados juntos.
- ▶ Un frame *T1* consiste de  $24 \times 8 = 192$  bits, más un bit extra para framing, conduciendo a 193 bits cada 125  $\mu$ seg.
- ▶  $1 / 0.000125 \text{ seg.} \times 193 \text{ bits} = 1544000 \text{ bps}$

***T1* = 1,544 Mbps**

- ▶ ITU tiene también una recomendación para un carrier PCM a 2048 Mbps llamado *E1*

# Modulación

Modems'

# Recordando los Principios básicos :

---

## ▶ Señal analógica vs señal digital

- ▶ La señal analógica utiliza una magnitud con una variación continua.
- ▶ La señal digital emplea valores discretos, predefinidos

## ▶ Módem vs Códec

- ▶ Módem (MODulador-DEModulador): convierte de digital a analógico y viceversa
- ▶ Códec (Codificador-DECodificador): convierte de analógico a digital y viceversa
- ▶ Son lo mismo ?????

# Modulación

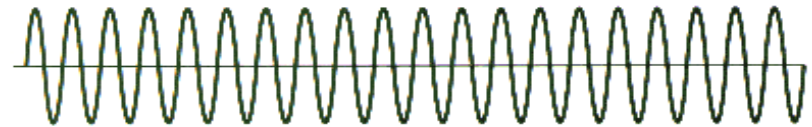
---

- ▶ Proceso de variación de cierta característica de una señal, llamada portadora, de acuerdo con una señal mensaje, llamada moduladora
- ▶ Tipos
  - ▶ Moduladora Analógica/Portadora Analógica
  - ▶ Moduladora Analógica/Portadora Digital
  - ▶ Moduladora Digital/Portadora Analógica
  - ▶ Moduladora Digital/Portadora Digital

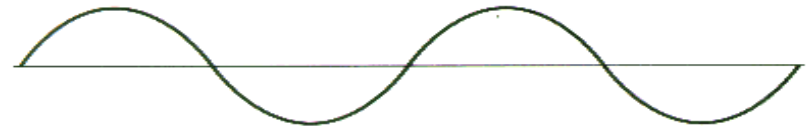
# M. Analógica/P. Analógica

---

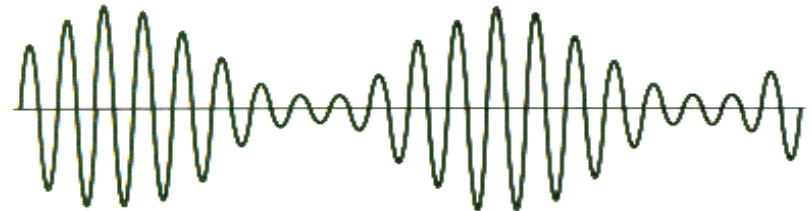
Portadora



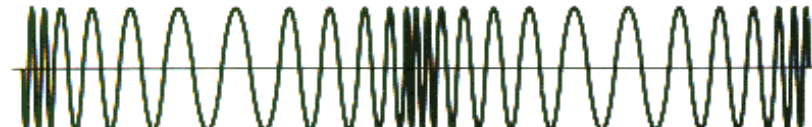
Señal sinusoidal modulante



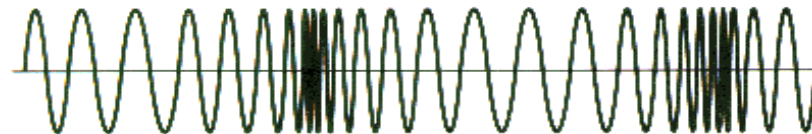
Onda de amplitud modulada (DSBTC)



Onda modulada en fase



Onda de frecuencia modulada



# M. Digital/P. Analógica

---

- ▶ La situación más conocida es la transmisión de datos digitales a través de la red telefonía, diseñada para transmitir señales analógicas en el rango de frecuencias de voz (300-3400Hz)
- ▶ Técnicas
  - ▶ Desplazamiento de Amplitud (ASK)
  - ▶ Desplazamiento de Frecuencia (FSK)
  - ▶ Desplazamiento de Fase (PSK)
  - ▶ Mixtas

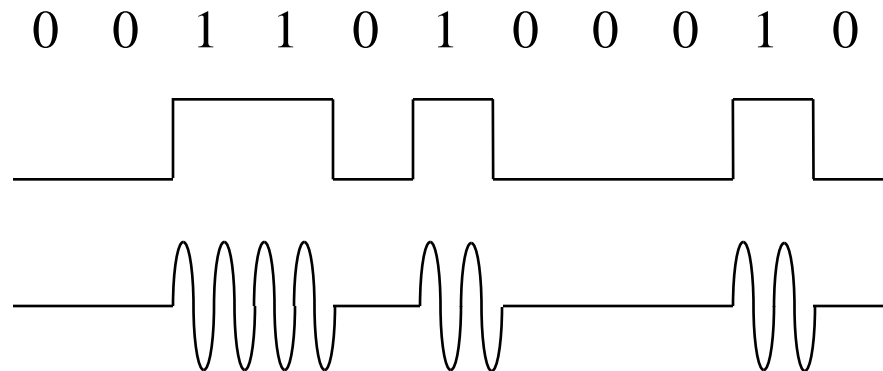


# M. Digital/P. Analógica

---

**ASK**, los valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora

$$S(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) \\ 0 \end{cases}$$

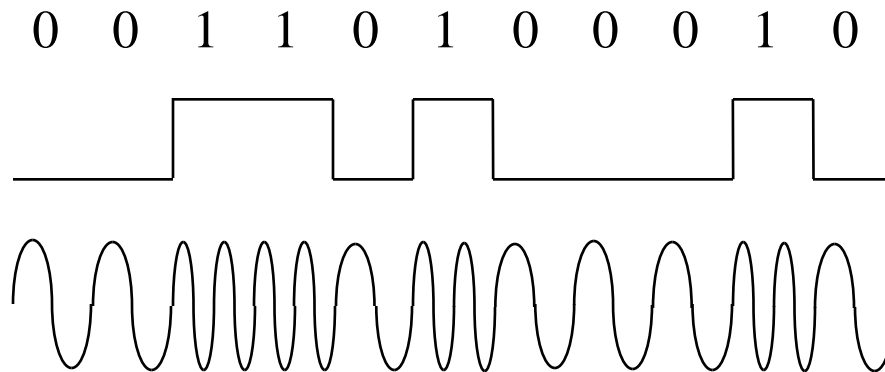


# M. Digital/P. Analógica

---

**FSK**, los valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes de la portadora

$$S(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_1 t) \\ A\cos(2\pi f_2 t) \end{cases}$$

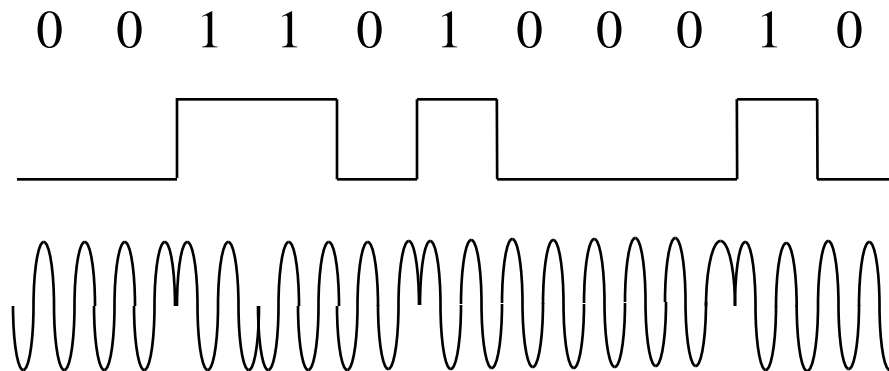


# M. Digital/P. Analógica

---

**PSK**, los valores binarios se representan mediante dos fases diferentes de la portadora

$$S(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t + \pi) \\ A\cos(2\pi f_c t) \end{cases}$$



# Velocidad de Modulación

---

- ▶ La **Velocidad de Modulación** se define como el número de cambios de señal por unidad de tiempo, y se expresa en baudios ( o símbolos/segundo)
- ▶ La **Velocidad de Transmisión**, expresada en bits/sg, equivale a la velocidad de modulación multiplicado por el número de bits representados por cada muestra

$$V_t = V_m * N$$

# M. Digital/P. Analógica ( cont.)

---

**Multinivel** Se consigue una utilización más eficaz del ancho de banda si cada elemento de la señal transmitida representa más de un bit.

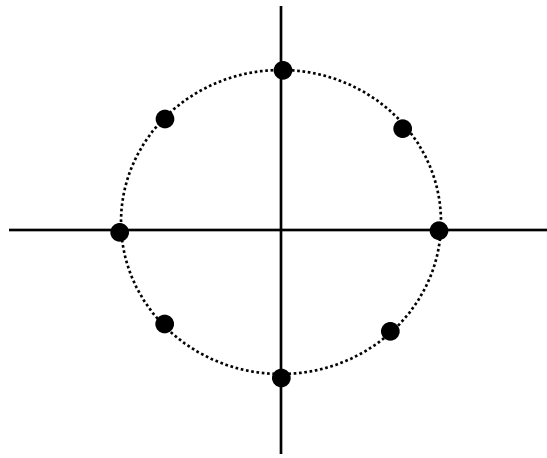
$$S(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t + 45) & 11 \\ A\cos(2\pi f_c t + 135) & 10 \\ A\cos(2\pi f_c t + 225) & 00 \\ A\cos(2\pi f_c t + 315) & 01 \end{cases}$$

Este esquema se puede ampliar, ya que se pueden transmitir tres, cuatro, etc. bits por señal transmitida, aumentando el número de fases distintas o incluso para cada ángulo el número de amplitudes (ASK-PSK)

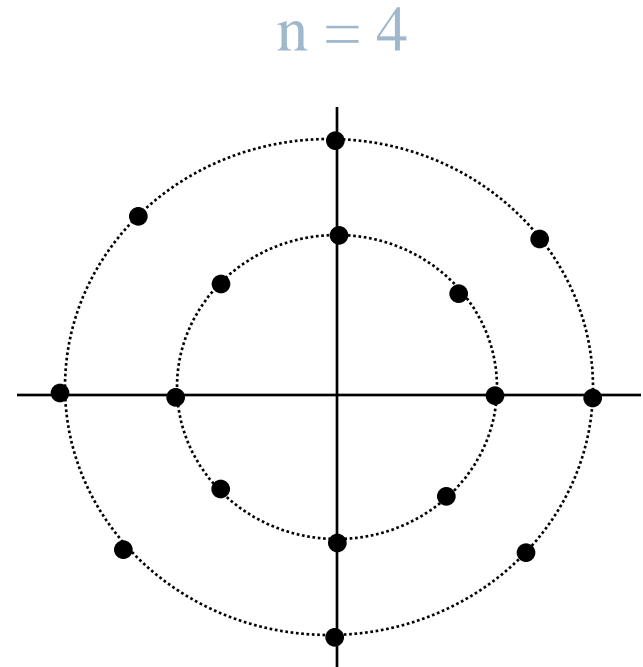
---

# M. Digital/P. Analógica

---

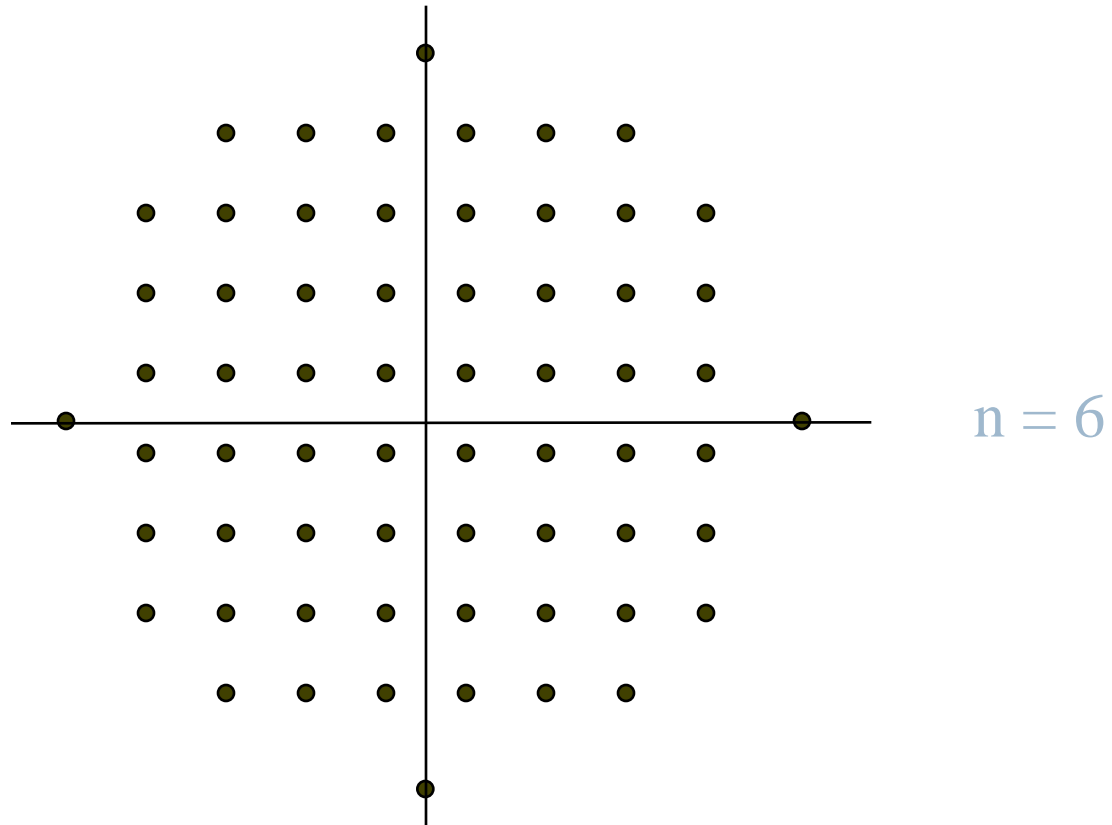


$n = 3$



# M. Digital/P. Analógica

## Modulación Trellis (QAM)



# M. Analógica/P. Digital

---

- ▶ Vimos que el proceso de conversión de señales analógicas en digitales se le denomina digitalización y a los dispositivos que lo llevan a cabo **codec**
- ▶ **Métodos**
  - ▶ Modulación por impulsos codificados (MIC/PCM) : que ya vimos
  - ▶ Modulación Delta



# M. Digital/P. Digital

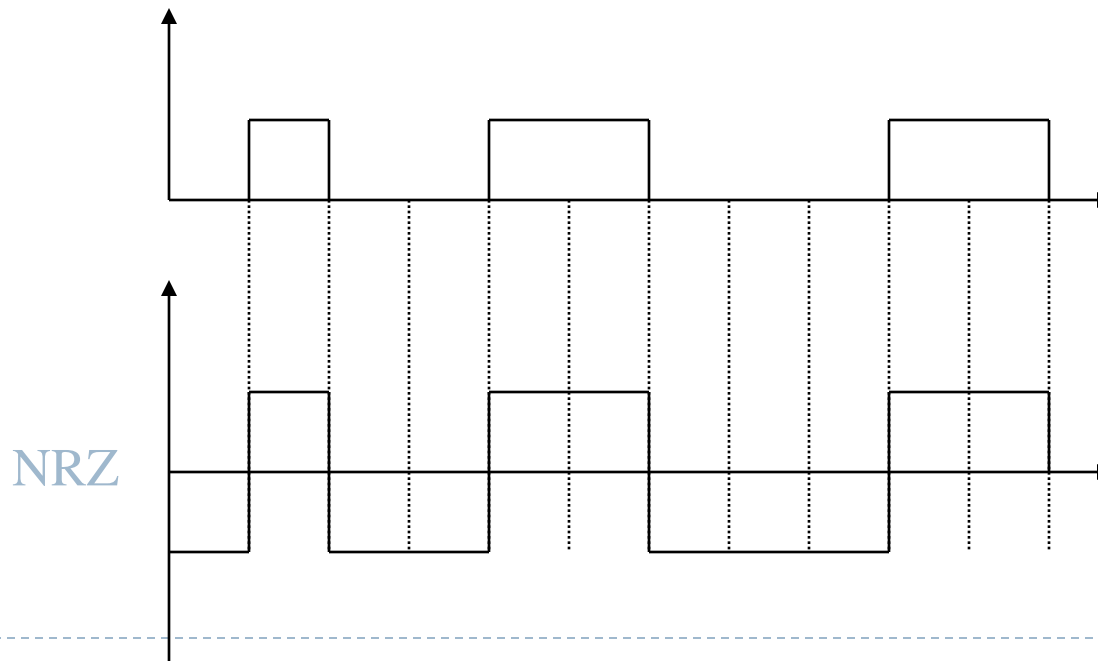
---

- ▶ Los datos binarios se transmiten codificando cada bit de datos en cada elemento de señal
- ▶ Motivo
  - ▶ Filtrado de las bajas frecuencias
  - ▶ Perdida de sincronismo

# NRZ

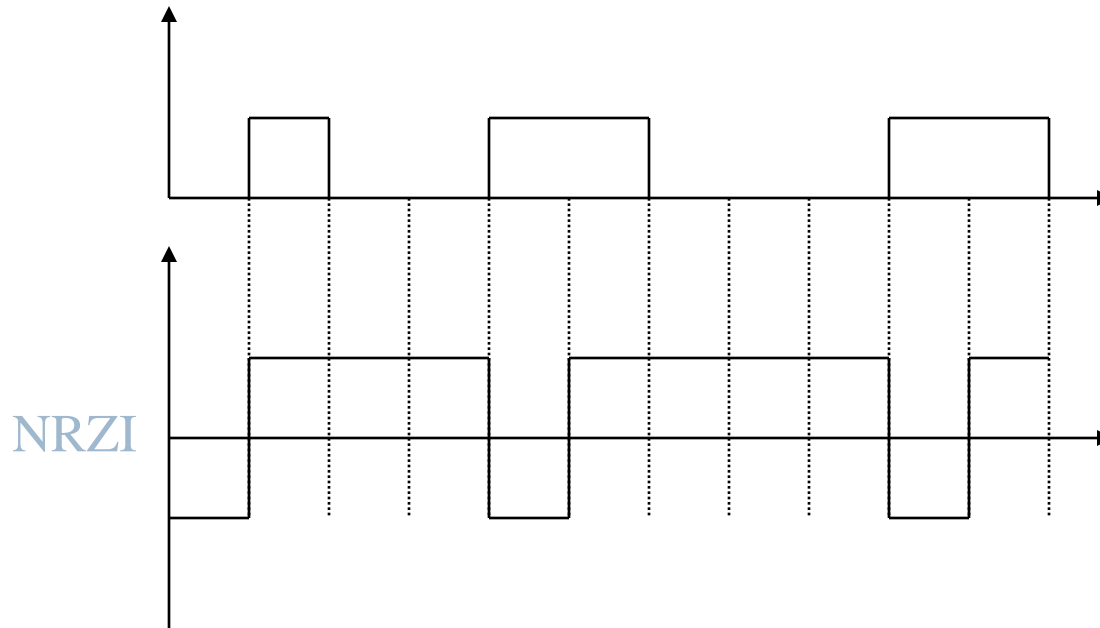
No retorno a cero (NRZ) Consiste en utilizar una tensión negativa para representar un 1 y una positiva para representar un 0

- Inconvenientes : alto alto – bajo bajo bajo ( “baseline wander” \*) y sincronismo



# NRZI

No retorno a cero con inversión de unos (NRZI) Los datos se codifican mediante la presencia o ausencia de una transición al principio del intervalo de un 1

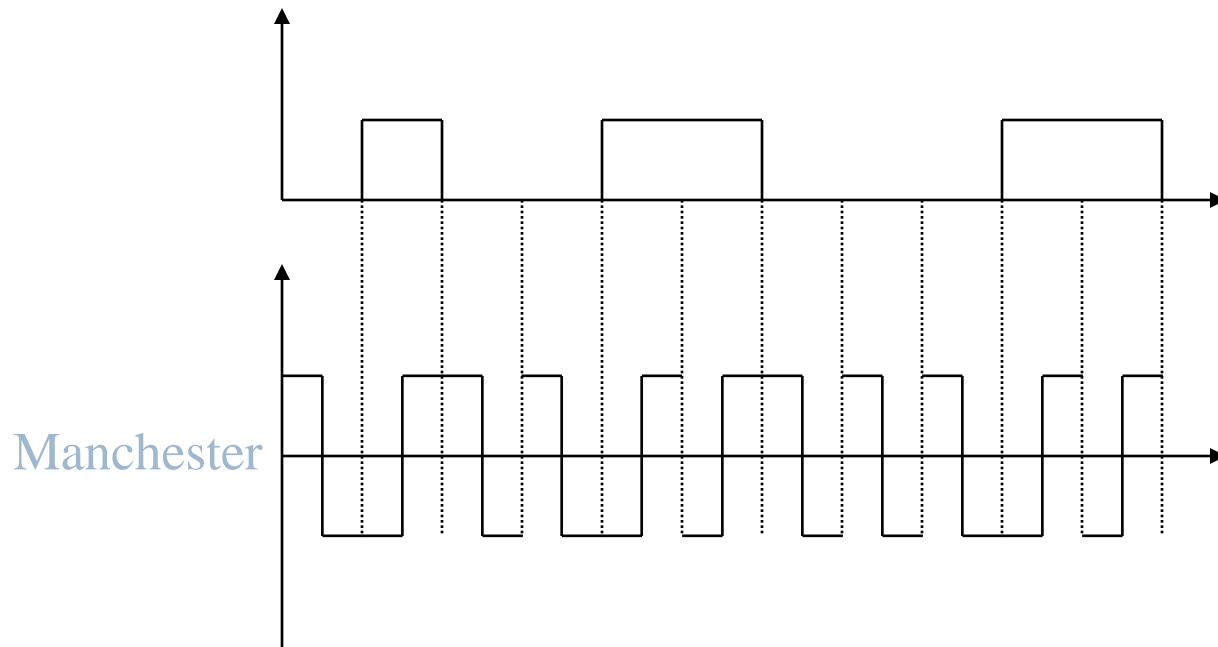


# Manchester (Bifase)

---

Manchester: Se codifica mediante una transición en la mitad del intervalo de duración del bit: de bajo a alto representa un 1 y de alto a bajo un 0

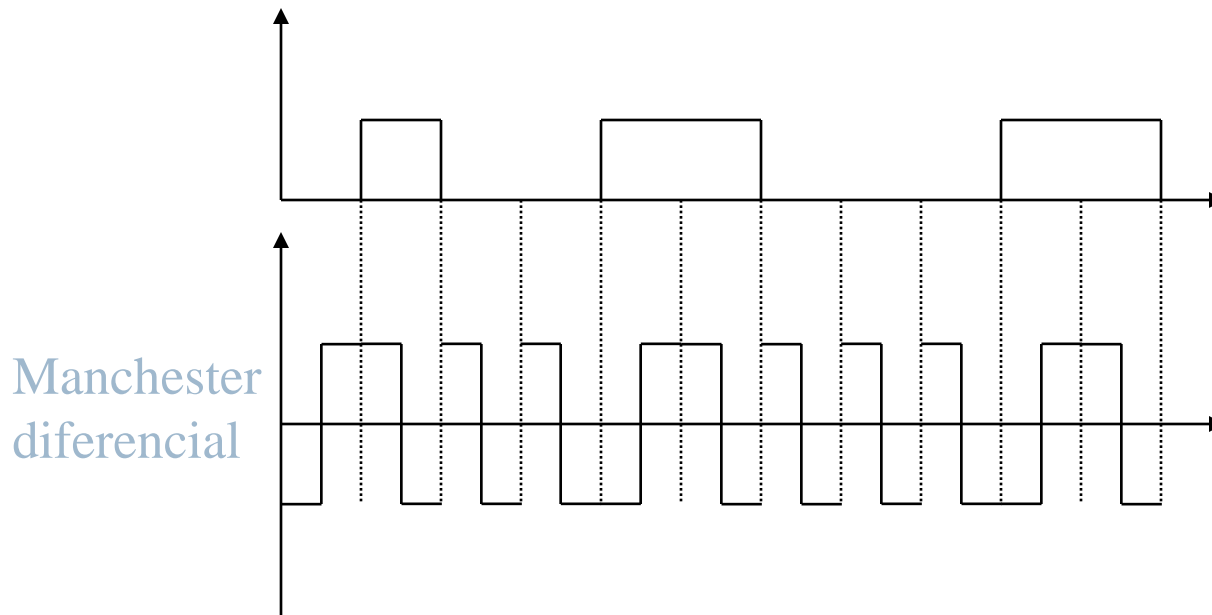
- Baud Rate = 2 \* Bit Rate !!!!!



# Manchester Diferencial

---

Bifase Diferencial (Manchester Diferencial) La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit y un 1 mediante la ausencia de transición



# Códigos de alta densidad

---

- ▶ Reemplaza secuencia de bits que dan lugar a niveles de tensión constante por otra que proporcione transiciones para que el receptor este sincronizado
- ▶ El receptor debe identificar la secuencia reemplazada y sustituirla por la original.
- ▶ 4B/5B

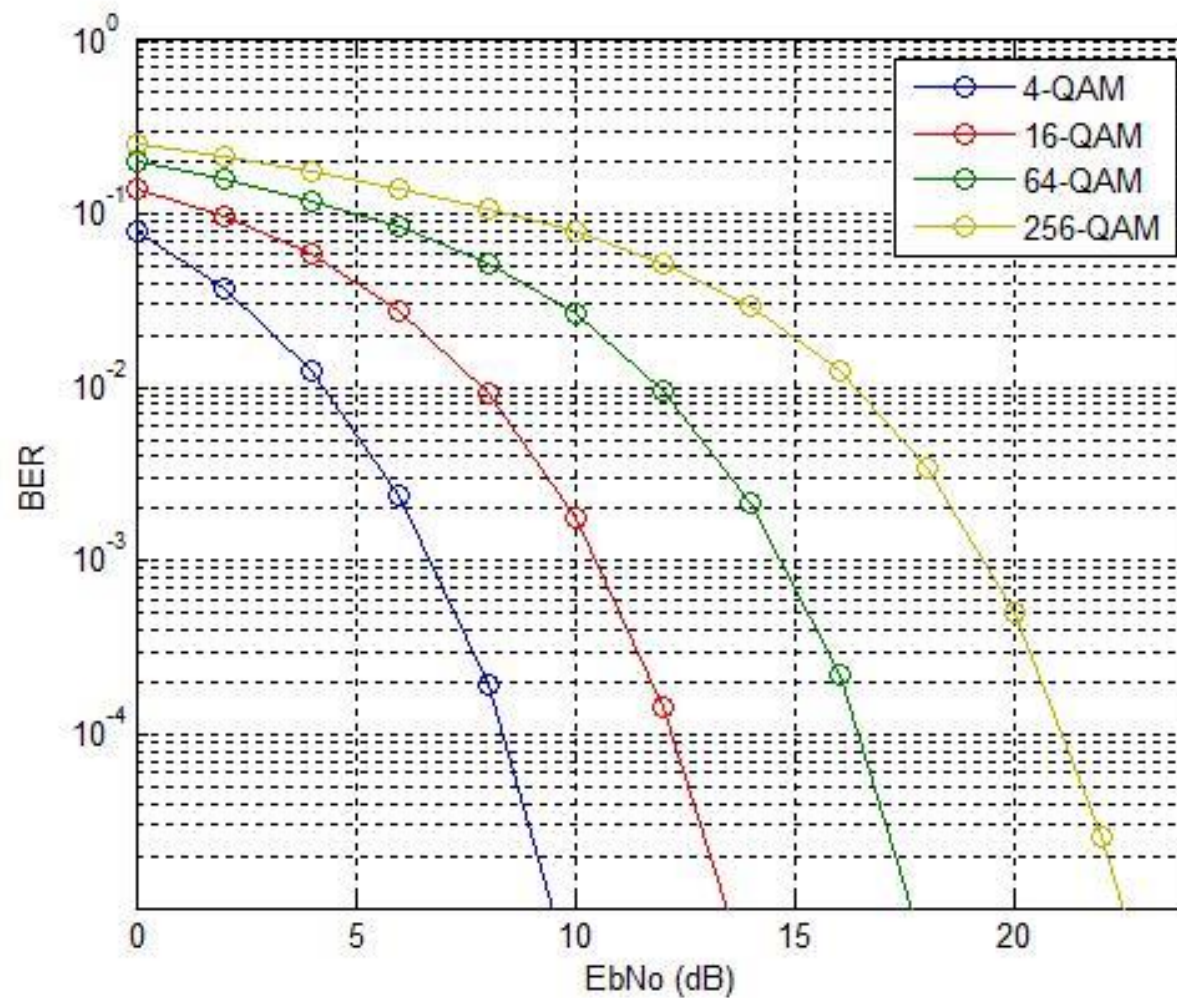
# Velocidad de Modulación

---

- ▶  $V_t = V_m \log n$      $n$  : estados posibles , 2, 4 , 16 , 64 , etc

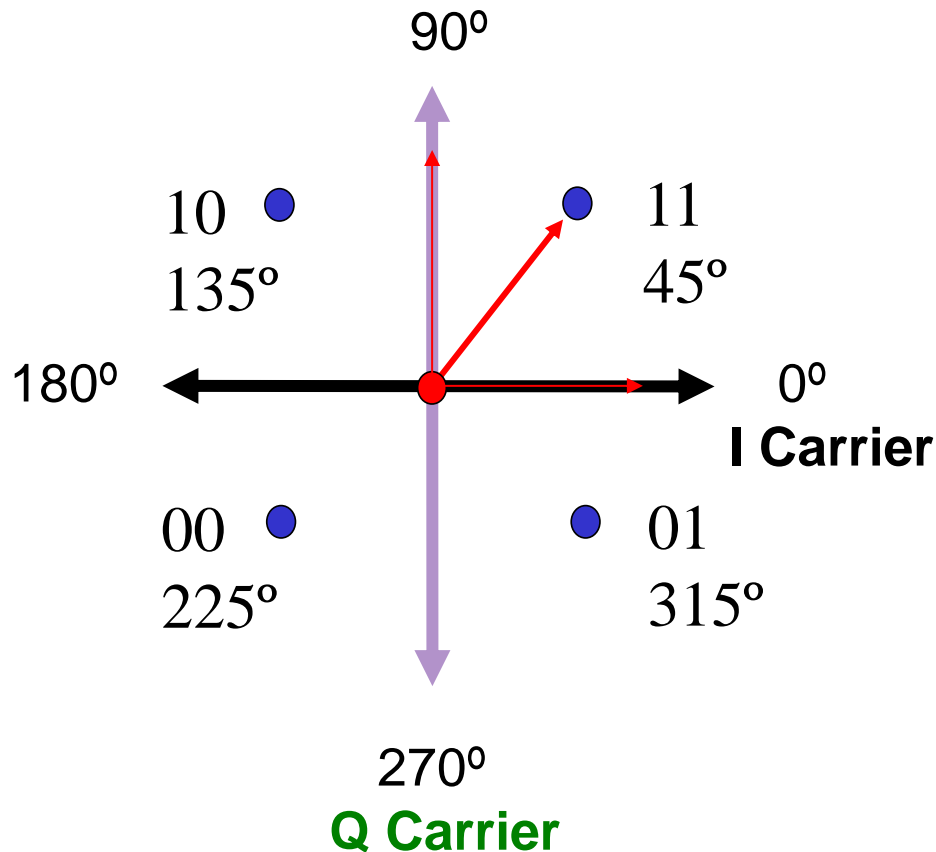
<i>constellation</i> ∈	BPSK	1bit / symbol
	QPSK	2bits / symbol
	16-QAM	4bits / symbol
	64-QAM	6bits / symbol
	256-QAM	8bits / symbol
	1024-QAM	10bits / symbol
	...	...

# BER – Modulación





# Modulación QPSK

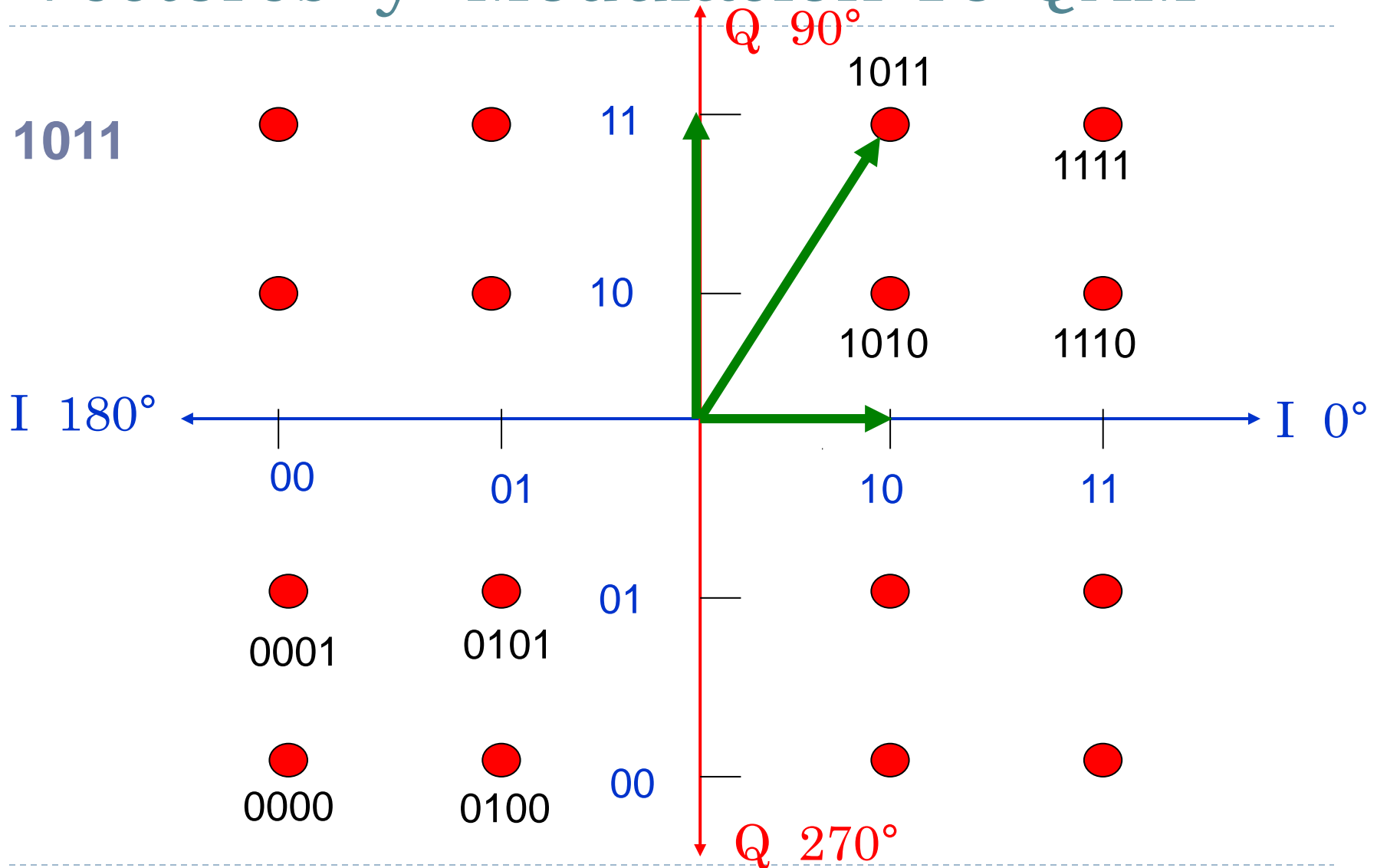


La portadora **I** Tx a 0°, la **Q** a 90°.

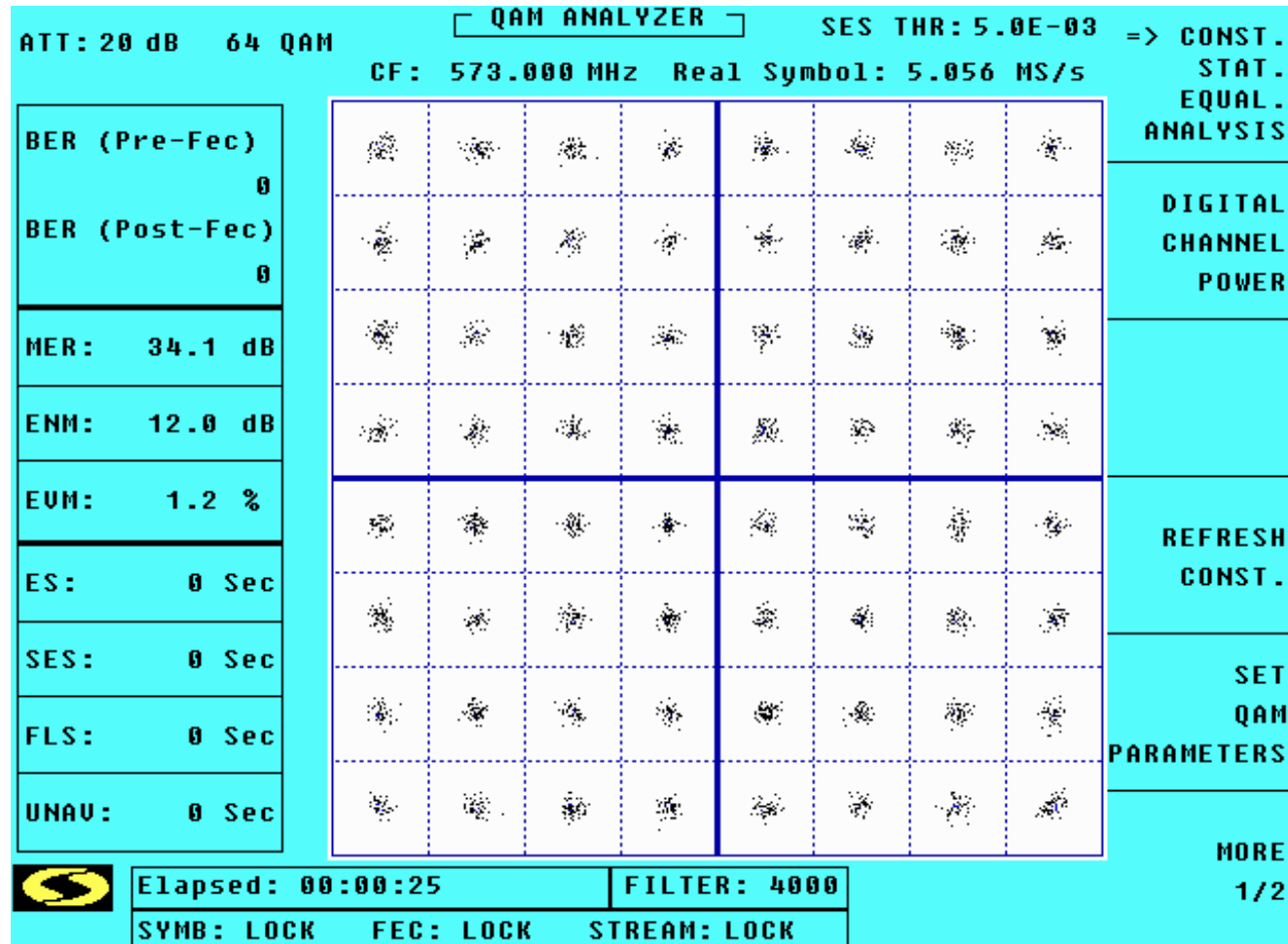
El vector resultante es a 45° representa el símbolo 11.

Si necesito Tx 01, => **I** a 0° y la portadora a 270°.

# Vectores y Modulación 16 QAM

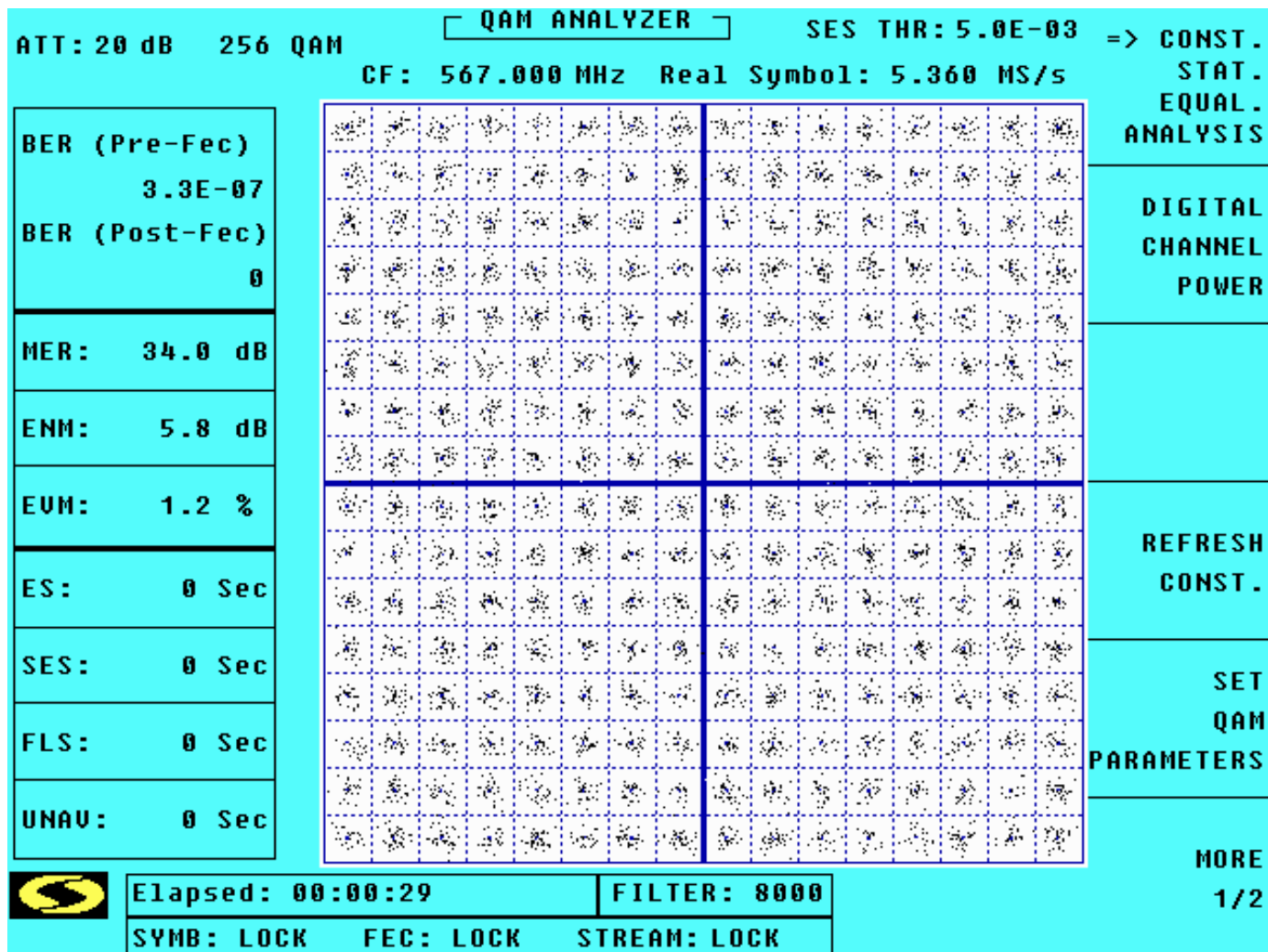


# Constelación de una modulación 64 QAM



6 Bits por símbolo !

# Modulación 256 QAM



8 Bits por símbolo